

第 部門 気温変化が CFRP 補強された鋼部材の疲労寿命に及ぼす影響

京橋メンテック(株) 正会員 岡本 陽介
 京橋メンテック(株) 正会員 神園 卓海
 京橋メンテック(株) 正会員 並木 宏徳
 明星大学 正会員 鈴木 博之

1. はじめに

近年、既存の鋼橋の溶接継手に疲労き裂の発生が相次いでいる。疲労き裂はひとたび発生すると進展を続け、適切な補修がなされないと部材の破断に至り、最悪の場合、落橋等の大事故を引き起こす。従って、緊急と判断された構造物については、少なからぬ補修費を投入して大規模な補修をしている事例も発生している。この鋼構造物に発生する疲労き裂の補修・補強に繊維強化プラスチックを適用することを目的とした研究が行われているが、未だ国内には確立された示方書等がないのが現状である。鋼材の線膨張係数が 12×10^{-6} であるのに対し、CFRP板は温度伸縮量が少なく殆ど 0 であるため、気温の変化により大きな熱応力が発生することが知られている。英国ICEのFRP補強のガイドブック¹⁾によると、熱応力が活荷重による応力よりも大となることがあるとして設計上留意すべきであるとしている。しかし、実際の補強設計に際して熱応力をどのように評価すれば良いかについて明確な指針は示されていない。そこで、本研究では、CFRPにより補強された鋼部材の疲労強度に熱応力が与える影響について簡単な指針を作成することを目的として、いくつかのケ - スについて試算した。

2. 試算条件

本研究では、CFRP 補強された鋼部材の疲労強度に及ぼす気温変化による熱応力に関して、疲労強度を支配するパラメータが公称応力の場合に限定して議論する。熱応力の最大値は、補強時の温度と想定される最高もしくは最低温度との差である温度変化量に依存する。気象庁が公表している平成 20 年 4 月～平成 21 年 3 月の東京における一日の最高および最低気温データ(表-1)を例にとって議論を進める。なお、構造部材の温度と気温とは一致しないので、構造部材に直射日光が当たるとかどうかなどを考慮して温度変化量が決定される。道路橋示方書では、鋼構造の場合基準温度を 20 とし、全体の温度変化を考慮する場合は -10 ～ 50 と 60 の温度変化を標準としている。東京での年間気温差は年によって異なるが表-1 では 0 ～ 35 であるので、鋼構造物の温度変化は気温変化よりかなり大きく、 $60/35=1.714$ となる。以下の議論では、基本的なケ - スとして、構造物の温度が気温変化の 2 倍と仮定して試算する。

評価方法として、気温変動分の応力変動が荷重変動に重複するとしてレンジペア - 法による評価を試みることにする。また、実働荷重の時は打ち切り限度を考えない修正マイナ - 則を用いるのが一般的であるので、本研究でもこれを採用する。鋼部材を CFRP で補強した後の応力範囲は次式で示される。

表 - 1 H20.4～H21.3の東京都の気温

| 一日の気温差 | | | | 一ヶ月間の平均気温差 | | | |
|------------|-----------|------------|------------|-----------------|-----------|--------------------|------|
| 気温差 () | 頻度 (日) | 温度差 () | 頻度× 温度差 | 月 | 平均 () | 平均温度差() (7月基準) | |
| 16 | 0 | 16.5 | 0.0 | 4 | 14.71 | -12.28 | |
| 15 | 1 | 15.5 | 15.5 | 5 | 18.45 | -8.54 | |
| 14 | 1 | 14.5 | 14.5 | 6 | 21.27 | -5.72 | |
| 13 | 0 | 13.5 | 0.0 | 7 | 26.99 | 0.00 | |
| 12 | 2 | 12.5 | 25.0 | 8 | 26.80 | -0.19 | |
| 11 | 9 | 11.5 | 103.5 | 9 | 24.39 | -2.60 | |
| 10 | 12 | 10.5 | 126.0 | 10 | 19.35 | -7.64 | |
| 9 | 26 | 9.5 | 247.0 | 11 | 13.13 | -13.86 | |
| 8 | 56 | 8.5 | 476.0 | 12 | 9.78 | -17.21 | |
| 7 | 54 | 7.5 | 405.0 | 1 | 6.76 | -20.23 | |
| 6 | 55 | 6.5 | 357.5 | 2 | 7.82 | -19.17 | |
| 5 | 57 | 5.5 | 313.5 | 3 | 9.96 | -17.03 | |
| 4 | 38 | 4.5 | 171.0 | | 合計 | -124.46 | |
| 3 | 37 | 3.5 | 129.5 | | 平均値 | -10.37 | |
| 2 | 12 | 2.5 | 30.0 | 一年間の気温差 | | | |
| 1 | 5 | 1.5 | 7.5 | | 最高 | 最低 | 温度範囲 |
| 合計 | 365 | | 2421.5 | H20.4～ H21.3 | 35.3 | 0 | 35.3 |
| | | 平均 | 6.63 | | | | |

Yosuke OKAMOTO, Takumi KAMIZONO, Hironori NAMIKI, Hiroyuki Suzuki

okamoto@kyobashi.net

$$\sigma_{re} = \sigma_0 \times A_0 / A_r \times A_r / (A_r + A_c) + \sigma_t$$

ここで、 σ_{re} ：補強後の応力範囲 σ_0 ：無補強時の応力範囲 σ_t ：熱応力範囲
 A_0 ：腐食前の断面積 A_r ：残存する断面積 A_c ：補強するCFRP板の断面積
 また、熱応力範囲は次式となる。

$$\sigma_t = E_c \times A_c / A_r \times \Delta T / \{ (1 + (E_c / E_s) \times (A_c / A_r)) \}$$

$$= \ln(1 + \Delta T)$$

ここで、 E_c ：CFRP板の弾性係数 E_s ：鋼板の弾性係数
 ΔT ：無補強時の気温変動によるひずみ(対数ひずみ) α ：鋼板の線膨張係数 T ：鋼板の温度差

これらの式を用いて、概ね疲労寿命が 50 年以上で、実際に作用する荷重と疲労被害が等しくなる一定応力範囲の荷重繰り返しを考える。この時、等価応力範囲の繰り返し数は 200 万回程度と考えられる。疲労寿命が 200 万回程度となる等価応力範囲はC等級で 100MPa程度であるので、毎日 100MPa程度の等価応力範囲の応力繰り返しが生じていると考える。ここに気温変化による熱応力が一日一回重複するとした場合と、平均応力として作用するとした場合を考える。平均応力は、一般的には片振り引張りに近い領域で影響があるとされており、引張り圧縮荷重下の耐久限度線図での傾きは-0.2 程度であるとされている。すなわち、疲れ限度の応力振幅 σ_a 、平均応力 σ_m の組み合わせには次の関係が成立する。

$$\sigma_w = \sigma_a + 0.2 \sigma_m \quad \text{ここで、} \sigma_w \text{：完全両振り}(\sigma_m=0)\text{の疲労許容応力振幅}$$

平均応力が σ_m だけ増加すると疲労許容応力振幅は $0.2 \sigma_m$ だけ減少することになる。すなわち、疲労許容応力範囲は $0.4 \sigma_m$ だけ減少することになる。

表-2 熱応力が一日一回重複する時の疲労被害

| 気温変動 | $\sigma_e + \sigma_t$ MPa | N_f $\times 10^6$ | 疲労被害 $\times 10^{-6}$ | 頻度(日) 回 | 疲労被害 \times 頻度 |
|-----------|------------------------------|------------------------|--------------------------|------------|---------------------|
| 31 | 117.17 | 0.91 | 1.10 | 1 | 1.10 |
| 29 | 116.06 | 0.95 | 1.05 | 1 | 1.05 |
| 27 | 114.95 | 1.00 | 1.00 | 0 | 0.00 |
| 25 | 113.84 | 1.05 | 0.95 | 2 | 1.91 |
| 23 | 112.74 | 1.10 | 0.91 | 9 | 8.16 |
| 21 | 111.63 | 1.16 | 0.86 | 12 | 10.36 |
| 19 | 110.52 | 1.22 | 0.82 | 26 | 21.36 |
| 17 | 109.41 | 1.28 | 0.78 | 56 | 43.74 |
| 15 | 108.31 | 1.35 | 0.74 | 54 | 40.09 |
| 13 | 107.20 | 1.42 | 0.71 | 55 | 38.79 |
| 11 | 106.09 | 1.49 | 0.67 | 57 | 38.16 |
| 9 | 104.98 | 1.57 | 0.64 | 38 | 24.14 |
| 7 | 103.88 | 1.66 | 0.60 | 37 | 22.29 |
| 5 | 102.77 | 1.75 | 0.57 | 12 | 6.85 |
| 3 | 101.66 | 1.85 | 0.54 | 5 | 2.70 |
| 0 | 100.00 | 2.0075 | 0.4981 | 39785 | 19818.18 |
| 合計 | | | | 40150 | 20078.89 |
| 50年間の疲労被害 | | | | | 1.0039 |

3. 試算結果および考察

補強条件を $A_c/A_r=0.3$ の場合で疲労設計曲線の傾き $m=5$ を例にとり、気温変化による熱応力が一日一回重複するとして考えた場合と平均応力として考えた場合の疲労被害を表-2、表-3に各々示す。

熱応力が作用しない時の疲労被害は 1 であるのに対し、CFRP 補強することにより、表-2 ではわずかではあるが疲労被害が増加している。一方、熱応力を平均応力として試算した場合(表-3)では、疲労被害が 12.2% 増加している。以上の試算結果より、熱応力をどのように捉えるかによって疲労に与える影響が変化するので、今後検討していく必要がある。

表-3 熱応力を平均応力とした場合の疲労被害

| 月 | 気温変動 | $\sigma_0 + 0.4 \sigma_t$ MPa | N_f $\times 10^6$ | 疲労被害 $\times 10^{-6}$ | 頻度 回 | 200万回 疲労被害 |
|-------------|-------|----------------------------------|------------------------|--------------------------|---------|---------------|
| 4 | 12.28 | 102.72 | 1.75 | 0.57 | 30 | 0.094 |
| 5 | 8.54 | 101.89 | 1.82 | 0.55 | 31 | 0.093 |
| 6 | 5.72 | 101.27 | 1.88 | 0.53 | 30 | 0.088 |
| 7 | 0.00 | 100.00 | 2.00 | 0.50 | 31 | 0.085 |
| 8 | 0.19 | 100.04 | 2.00 | 0.50 | 31 | 0.085 |
| 9 | 2.60 | 100.58 | 1.94 | 0.51 | 30 | 0.085 |
| 10 | 7.64 | 101.69 | 1.84 | 0.54 | 31 | 0.092 |
| 11 | 13.86 | 103.07 | 1.72 | 0.58 | 30 | 0.096 |
| 12 | 17.21 | 103.81 | 1.66 | 0.60 | 31 | 0.102 |
| 1 | 20.23 | 104.48 | 1.61 | 0.62 | 31 | 0.106 |
| 2 | 19.17 | 104.25 | 1.62 | 0.62 | 28 | 0.094 |
| 3 | 17.03 | 103.77 | 1.66 | 0.60 | 31 | 0.102 |
| (7月に施工した場合) | | | | 計 | 365 | 1.122 |

4. まとめ

本研究では、鋼部材と CFRP の線膨張係数の違いにより発生する熱応力が、鋼部材を CFRP 補強した場合に鋼部材の疲労寿命に与える影響について検討した。その結果、CFRP を貼付することにより熱応力が発生し、疲労被害が増加することがわかった。

参考文献：1) ICE design and practice guide, “FRP

composites – life extension and strengthening of metallic structures”, Thomas telford, 2001